

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
22. Mai 2003 (22.05.2003)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 03/042627 A2

- (51) Internationale Patentklassifikation⁷: G01B 7/34
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP02/12513
- (22) Internationales Anmeldedatum:
8. November 2002 (08.11.2002)
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität:
101 55 930.5 14. November 2001 (14.11.2001) DE
- (71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): UNIVERSITÄT KASSEL [DE/DE];
Mönchebergstrasse 19, 34125 Kassel (DE).
- (72) Erfinder; und
- (75) Erfinder/Anmelder (nur für US): EDINGER, Klaus [DE/US]; 9210 Gold Dust Court, Laurel, MD 20723 (US). RANGELOW, Ivajlo [DE/DE]; Obere Sommerbachstrasse 45, 24225 Baunatal (DE). GRABIEC, Piotr [PL/PL]; Ul. Kazury 7, PL-02-795 Warschau (PL). MEL-NGAILIS, John [US/US]; 3314 Brooklawn Terrasse, Chevy Chase, MD 20815 (US).
- (74) Anwalt: MANITZ, FINSTERWALD & PARTNER GBR; Postfach 31 02 20, 80102 München (DE).

- (81) Bestimmungsstaaten (national): AE, AG, AL, AM, AT (Gebrauchsmuster), AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ (Gebrauchsmuster), CZ, DE (Gebrauchsmuster), DE, DK (Gebrauchsmuster), DK, DM, DZ, EC, EE (Gebrauchsmuster), EE, ES, FI (Gebrauchsmuster), FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK (Gebrauchsmuster), SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.
- (84) Bestimmungsstaaten (regional): ARIPO-Patent (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches Patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches Patent (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, SK, TR), OAPI-Patent (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

(54) Title: FIELD EFFECT TRANSISTOR SENSOR

(54) Bezeichnung: FELDEFFEKTTRANSISTOR-SENSOR

(57) Abstract: The invention relates to a sensor, especially for the probe of a screen probe microscope, for examining probe surfaces or areas adjacent to the sensor, comprising at least one field effect transistor (FET) made of at least one semiconductor material. The invention also relates to a hall sensor made of at least one semiconductor material for detecting magnetic fields and whose lateral resolution capacity can be electrically adjusted, in addition to a semiconductor electrode whose electrode surface can be electrically adjusted.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft einen Sensor, insbesondere für eine Sonde eines Rastersondenmikroskops, zum Untersuchen sich benachbart zum Sensor befindlicher Probenoberflächen oder Felder mit zumindest einem, wenigstens ein Halbleitermaterial aufweisenden Feldeffekttransistor (FET). Des Weiteren betrifft die Erfindung einen Hallsensor aus zumindest einem Halbleitermaterial zum Detektieren von magnetischen Feldern, dessen laterales Auflösungsvermögen elektrisch einstellbar ist, sowie eine Halbleiter-elektrode, deren Elektrodenfläche elektrisch einstellbar ist.

Rest Available Copy

WO 03/042627 A2

WO 03/042627

PCT/EP02/12513

Feldeffekttransistor-Sensor

- 5 Die Erfindung betrifft einen Sensor mit zumindest einem, wenigstens ein Halbleitermaterial aufweisenden Feldeffekttransistor (FET).

Grundsätzlich ist die Verwendung eines Feldeffekttransistors, insbesondere eines Metalloxidhalbleiter-Feldeffekttransistors (MOS-FET), als Sensor
10 bekannt. Während bei einem herkömmlichen MOS-FET der elektrische Widerstand des Transistorkanals (gate) mittels einer durch eine Oxidschicht gegenüber dem Kanal isolierten Kanalelektrode gesteuert wird, ist eine derartige Elektrode bei einem FET-Sensor nicht vorgesehen. Bei der Verwendung des FET als Sensor wird der Widerstand des Transistorka-
15 nals durch die Wechselwirkung mit einer zu untersuchenden Probe beeinflusst, wodurch sich Rückschlüsse auf die Beschaffenheit der Probe, insbesondere der Probenoberfläche, ziehen lassen.

Aus der US 4,873,871 ist beispielsweise die Verwendung eines Feldeffekt-
20 transistors als Beschleunigungssensor bekannt. Dabei ist in der Nähe des Transistorkanals ein bei Beschleunigung des Sensors auslenkbarer Mikrobalken derart angeordnet, dass sich bei Annäherung des Mikrobalkens an den Transistorkanal oder bei Entfernung des Mikrobalkens vom Transistorkanal der Kanalwiderstand entsprechend ändert.

25

In der US 4,020,830 ist die Verwendung eines Feldeffekttransistors als chemischer Sensor offenbart. Dabei ist auf einer Isolationsschicht des Transistorkanals eine Membran angebracht, die mit der Oberfläche einer

WO 03/042627

PCT/EP02/12513

2

zu untersuchenden Probe, beispielsweise einer Flüssigkeit, in Kontakt gebracht wird. Die Membran ist derart ausgebildet, dass sie selektiv mit einer vorbestimmten Art von Ionen der Probe wechselwirkt. Das Anlegen einer Spannung zwischen der Probe und dem Transistor resultiert in einer Wechselwirkung zwischen der Membran und den Ionen der Probe, die ihrerseits zu einer Veränderung des Kanalwiderstandes des Transistors führt, die Rückschlüsse auf die Beschaffenheit der zu untersuchenden Probe zulässt.

- 5 10 Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, einen Feldeffekttransistor-Sensor zur Untersuchung von Probenoberflächen mit möglichst hoher Ortsauflösung zu schaffen.

- 15 Zur Lösung der Aufgabe ist ein Sensor mit den Merkmalen des Anspruchs 1 vorgesehen.

- 20 Ein erfindungsgemäßer Sensor, insbesondere für eine Sonde eines Raster-sondenmikroskops, zum Untersuchen sich benachbart zum Sensor befindlicher Probenoberflächen oder Felder sieht zumindest einen, wenigstens ein Halbleitermaterial aufweisenden Feldeffekttransistor (FET) ohne Kanalelektrode vor, dessen Oberfläche zumindest im Bereich des Kanals (gate) dreidimensional ausgebildet ist.

- 25 Die laterale Auflösung eines FET-Sensors hängt sowohl vom Abstand des Sensors zur Probe, der im Wesentlichen durch die Dicke einer den Transistorkanal überdeckenden Schicht aus einem Dielektrikum begrenzt ist, als auch von der Dimension des Kanals, d.h. seiner Länge und seiner Breite, ab. Je kleiner der Proben/Sensor-Abstand gewählt und je kleiner

WO 03/042627

PCT/EP02/12513

3

der Kanal dimensioniert ist, desto höher ist das Auflösungsvermögen des Sensors.

5 Dabei ist die Dimension des Transistorkanals unter anderem durch die bei der Herstellung des FET-Sensors eingesetzten Verfahren, insbesondere die Lithographieverfahren, vorgegeben. Ist die Transistoroberfläche im Bereich des Kanals, wie erfindungsgemäß vorgesehen, zusätzlich jedoch dreidimensional, beispielsweise spitz, ausgebildet, und wird der Kanal z.B. über den Scheitelpunkt einer aus einem Halbleitermaterial bestehenden Pyra-
10 mide oder eines Kegels gelegt, kann das laterale Auflösungsvermögen wegen der Abstandsabhängigkeit der elektrischen Feldstärke die Dimension des Kanals und somit das sonst durch die Strukturierungsverfahren begrenzte maximale Auflösungsvermögen übersteigen. Durch die erfindungsgemäß vorgesehene dreidimensionale Ausbildung der Transistor-
15 oberfläche zumindest im Bereich des Kanals (gate) ist das laterale Auflösungsvermögen eines erfindungsgemäßen Sensors folglich gegenüber einem Sensor mit planer Transistoroberfläche erhöht.

20 Ein erfindungsgemäßer Sensor lässt sich also besonders gut zur Detektion von elektrischen, magnetischen und/oder chemischen Wechselwirkungen sowie zur Detektion elektromagnetischer Strahlung mit hoher Ortsauflösung einsetzen.

25 Da eine derartige Spitzengeometrie auch bei Detektionssonden in der Rasterkraftmikroskopie verwendet wird, kann ein erfindungsgemäßer Sensor darüber hinaus zusätzlich oder gleichzeitig als Sonde eines herkömmlichen Rasterkraftmikroskops verwendet werden.

WO 03/042627

PCT/EP02/12513

4

Vorteilhafte Ausführungsformen der Erfindung sind den Unteransprüchen, der Beschreibung und der Zeichnung zu entnehmen.

Gemäß einer vorteilhaften Ausführungsform des erfindungsgemäßen
 5 Sensors ist die Oberfläche im Bereich des Kanals (gate) pyramidenartig
 ausgebildet. Dadurch lässt sich die Abstandsabhängigkeit der elektrischen
 Feldstärke besonders gut zur Verbesserung des Auflösungsvermögens des
 Sensors ausnutzen. Darüber hinaus lassen sich pyramidenartige Struktu-
 10 ruren, insbesondere in kristallinen Halbleitersubstraten, durch Plasma-
 Ätzverfahren leicht erzeugen (vgl. z.B. H. Jansen et al., A Survey on the
 -Reactive Ion Etching of Silicon in Microtechnology, J. Micromech. Mic-
 roeng., Vol. 6, 14ff (1996)).

Alternativ kann die Oberfläche im Bereich des Kanals (gate) kegelförmig,
 15 treppenartig oder keilförmig ausgebildet sein.

Gemäß einer Variante des erfindungsgemäßen Sensors ist der Transistor
 als Feldeffekttransistor vom Anreicherungstyp (enhancement mode FET)
 ausgebildet.

20
 Gemäß einer besonders bevorzugten Ausführungsform des erfindungsge-
 mäßen Sensors ist der Transistor als Feldeffekttransistor vom Verar-
 mungstyp (depletion mode FET) ausgebildet. In Transistoren dieses Typs
 fließt bereits ohne ein äußeres elektrisches Feld ein Strom zwischen Quel-
 25 le (source) und Senke (drain), der ein Maß für den elektrischen Wider-
 stand des Kanals (gate) darstellt. Im Gegensatz zum FET vom Anreiche-
 rungstyp muss der Kanal nicht erst durch ein äußeres Feld invertiert
 werden, um einen Stromfluss zwischen Quelle und Senke zu ermöglichen,

WO 03/042627

PCT/EP02/12513

5

so dass beim FET-Sensor vom Verarmungstyp vergleichsweise kleine elektrische Felder ausreichen, um den Kanalwiderstand zu verändern, und somit der Messung zugänglich gemacht werden. Die Verwendung eines Feldeffekttransistors vom Verarmungstyp resultiert folglich in einem

5 Sensor mit erhöhter Empfindlichkeit.

Besonders günstig ist es, wenn der Sensor eine Elektrode zum Anlegen einer Einstellspannung aufweist, um den elektrischen Widerstand des Kanals (gate) elektrisch voreinzustellen. Auf diese Weise lässt sich die

10 Empfindlichkeit des erfindungsgemäßen Sensors auf die Stärke eines elektrischen Feldes anpassen.

Vorteilhafterweise ist der Transistor als Sperrschicht-Feldeffekttransistor (junction field effect transistor JFET) ausgebildet. Derartige Transistoren

15 ermöglichen auf einfache Weise die Einstellung des Kanalwiderstandes auf einen vorbestimmten Wert.

Weiterer Gegenstand der Erfindung ist ein Verfahren zum orts aufgelösten Untersuchen einer sich im wesentlichen in XY-Richtung erstreckenden

20 Probenoberfläche, bei dem ein Sensor nach einer der voranstehend genannten Art an einem zur Probenoberfläche weisenden Ende einer Sonde eines Rastersondenmikroskops angebracht wird, der Sensor in die Nähe der Probenoberfläche gebracht wird, zwischen Quelle (source) und Senke (drain) des Transistors eine Spannung angelegt wird, zwischen Probe und

25 Sensor gegebenenfalls eine Spannung angelegt wird, der Sensor, insbesondere in einer Rasterbewegung, in XY-Richtung relativ zur Probenoberfläche bewegt wird, wobei entweder der Sensor in einer konstanten Höhe Z bezüglich der XY-Ebene über der Probenoberfläche gehalten wird und der

WO 03/042627

PCT/EP02/12513

6

- Stromfluss von der Quelle (source) durch den Kanal (gate) zur Senke (drain) gemessen und in Abhängigkeit der XY-Position des Sensors aufgezeichnet wird, oder der Sensor derart in konstantem Abstand zur Probenoberfläche bewegt wird, dass der Stromfluss von der Quelle (source) durch den Kanal (gate) zur Senke (drain) konstant bleibt, und das Ausmaß einer Bewegung des Sensors in Z-Richtung in Abhängigkeit der XY-Position des Sensors aufgezeichnet wird, und aus den aufgezeichneten Strom- oder Auslenkungswerten ein Abbild der Probenoberfläche erstellt wird.
- 10 Das erfindungsgemäße Verfahren stellt eine Möglichkeit zur Verwendung eines erfindungsgemäßen Sensors dar, bei der das Auflösungsvermögen des Sensors besonders gut ausgenutzt werden kann.
- 15 Bevorzugt wird ein FET-Sensor vom Verarmungstyp verwendet und eine Einstellspannung an den Sensor angelegt, um den Widerstand des Kanals (gate) auf einen vorbestimmten Wert voreinzustellen. Dadurch lässt sich die Empfindlichkeit des Sensors auf die zu untersuchende Probe anpassen.
- 20 Weiterer Gegenstand der Erfindung ist ein Hallsensor aus zumindest einem Halbleitermaterial zum Detektieren von magnetischen Feldern, dessen laterales Auflösungsvermögen elektrisch einstellbar ist. Mittels eines derartigen Hallsensors lässt sich die Stärke eines magnetischen Feldes besonders gut orts aufgelöst messen.
- 25 Bevorzugt sind bei einem erfindungsgemäßen Hallsensor zumindest zwei quer zueinander, insbesondere senkrecht aufeinanderstehende, sich in einem Kreuzungsbereich kreuzende Kanäle in einem Substrat vorgesehen,

WO 03/042627

PCT/EP02/12513

7

die eine gegenüber dem Substrat umgekehrte Polarität der Mehrheitsladungsträger aufweisen, wobei an einem Kanal zur Erzeugung eines Stromflusses durch den Kanal eine Steuerspannung anlegbar und an dem anderen Kanal eine durch ein magnetisches Feld erzeugte Hallspannung messbar ist.

Vorteilhafterweise weist ein erfindungsgemäßer Hallsensor eine Elektrode zum Anlegen einer Einstellspannung auf, um die Ausdehnung des Kreuzungsbereiches in der durch die Kanäle aufgespannten Ebene einzustellen. Auf diese Weise ist das Auflösungsvermögen des Hallsensors einstellbar, insbesondere erhöhbar.

Weiterer Gegenstand der Erfindung ist eine Halbleiterelektrode, deren Elektrodenfläche elektrisch einstellbar ist. Mittels einer derartigen Elektrode lassen sich besonders hoch orts aufgelöste Kapazitätsmessungen oder elektrochemische Potentialbestimmungen an zu untersuchenden Proben durchführen.

Vorteilhafterweise ist in einer erfindungsgemäßen Halbleiterelektrode in einem Halbleitersubstrat ein von außerhalb des Substrats kontaktierbarer, im wesentlichen parallel zur Substratoberfläche verlaufender erster Kanalabschnitt vorgesehen, der in einen senkrecht zur Substratoberfläche verlaufenden zweiten Kanalabschnitt übergeht, welcher an die Substratoberfläche grenzt, wobei die Elektrodenfläche durch die laterale Ausdehnung des zweiten Kanalabschnitts an der Substratoberfläche bestimmt ist.

Bevorzugt weisen die Kanalabschnitte eine gegenüber dem Substrat umgekehrte Polarität der Mehrheitsladungsträger auf.

WO 03/042627

PCT/EP02/12513

8

- Besonders günstig ist es, wenn die Halbleiterelektrode eine Elektrode zum Anlegen einer Einstellspannung aufweist, um die Ausdehnung der Kanalabschnitte und insbesondere die Ausdehnung des zweiten Kanalabschnitts an der Substratoberfläche einzustellen. Dadurch ist die Elektrodenfläche einstellbar, insbesondere verringerbar, wodurch sich die Auflösung einer orts aufgelösten Kapazitätsmessung oder Potentialbestimmung einstellen, insbesondere erhöhen lässt.
- 10 Weiterer Gegenstand der Erfindung ist ein Verfahren zur orts aufgelösten Kapazitätsmessung oder elektrochemischen Potentialbestimmung einer sich in XY-Richtung erstreckenden Probe, bei dem eine Halbleiterelektrode nach einer der voranstehend genannten Arten an einem zur Probenoberfläche weisenden Ende einer Sonde eines Rastersondenmikroskops angebracht wird, an dem Halbleitersubstrat eine Einstellspannung angelegt wird, um die Ausdehnung der Elektrodenfläche auf einen vorbestimmten Wert einzustellen, die Elektrode, insbesondere in einer Rasterbewegung, in XY-Richtung relativ zur Probe bewegt wird, die Elektrode in vorbestimmten Abständen mit der Probe in Kontakt gebracht wird, wobei zwischen
- 20 Probe und Sensor gegebenenfalls eine Spannung angelegt wird, die Kapazität oder das elektrochemische Potential der Probe bestimmt und in Abhängigkeit der XY-Position der Elektrode aufgezeichnet wird, und aus den aufgezeichneten Kapazitäts- oder Potentialwerten ein Abbild der Probe erstellt wird.
- 25 Nachfolgend werden die verschiedenen Aspekte der Erfindung rein beispielhaft anhand jeweils einer Ausführungsform unter Bezugnahme auf die Zeichnung beschrieben. Es zeigen:

WO 03/042627

PCT/EP02/12513

9

- Fig. 1 einen Feldeffekttransistor vom Anreicherungstyp ohne Kanalelektrode;
- 5 Fig. 2 einen Sperrschicht-Feldeffekttransistor vom Verarmungstyp ohne Kanalelektrode;
- Fig.3 einen erfindungsgemäßen Sensor;
- 10 Fig. 4 alternative Ausbildungen der Sensoroberfläche im Bereich des Kanals;
- Fig. 5 eine Draufsicht eines erfindungsgemäßen Hallsensors;
- 15 Fig. 6 eine Schnittansicht des Hallsensors entlang der Linie A-A von Fig. 5;
- Fig. 7 eine Draufsicht einer erfindungsgemäßen Halbleiterelektrode;
- 20 Fig. 8 eine Schnittansicht der Halbleiterelektrode entlang der Linie B-B von Fig. 7.

In Fig. 1 ist ein als Detektor einsetzbarer bekannter planarer Feldeffekttransistor (FET) vom Anreicherungstyp (enhancement mode FET) dargestellt, der ein p-dotiertes Siliziumsubstrat 10 umfasst. In der Nähe einer Sensoroberfläche 12 weist das Substrat 10 zwei jeweils n⁺-dotierte Bereiche 14, 16 auf, wobei der eine Bereich 14 mittels einer Senkenelektrode

WO 03/042627

PCT/EP02/12513

10

18 kontaktiert und mit einer Spannungsquelle 20 verbunden ist und als Senke (drain) wirkt. Der andere n^+ -dotierte Bereich 16 ist mittels einer Quellenelektrode 22 geerdet und wirkt als Quelle (source). Die Sensoroberfläche 12 ist mit einer Schicht 24 aus einem Dielektrikum, vorzugsweise aus Siliziumdioxid, versehen.

Der zwischen Senke 14 und Quelle 16 gelegene oberflächennahe Bereich des Substrats 10 bildet den Kanal 26 (gate) des Transistors. Während bei Metalloxidhalbleiter-Feldeffekttransistoren (MOS-FET) im Bereich des Kanals 26 typischerweise eine Kanalelektrode auf der Oxydschicht 24 angebracht wird, um durch eine an die Kanalelektrode angelegte Spannung die Leitfähigkeit des Kanals 26 und somit den Stromfluss von Quelle 16 zu Senke 14 zu steuern, ist bei einem als Sensor eingesetzten FET eine solche Kanalelektrode nicht vorgesehen. Bei derartigen Sensortransistoren erfolgt die Beeinflussung der Leitfähigkeit des Kanals 26 durch elektrische, magnetische oder chemische Wechselwirkungen des Kanals 26 mit zu untersuchenden äußeren Feldern oder Probenoberflächen, oder indem die Sensoroberfläche 12 elektromagnetischer Strahlung ausgesetzt wird.

Bei dem in Fig. 1 gezeigten Sensor handelt es sich um einen FET vom Anreicherungstyp, das bedeutet, der Kanal 26 weist grundsätzlich die gleiche Dotierung wie das Substrat 10 auf. Ein Stromfluss von Quelle 16 zu Senke 14 kann daher nur erfolgen, wenn der Kanal 26 invertiert wird, d.h. wenn ein äußeres zu untersuchendes elektrisches Feld so stark ist, dass durch die Erzeugung einer ausreichenden Anzahl beweglicher Ladungsträger (Elektronen) der elektrische Widerstand des Kanals 26 ausreichend verringert wird.

WO 03/042627

PCT/EP02/12513

11

Da für die Inversion des Kanals 26 entsprechend starke elektrische Felder nötig sind, weist ein FET vom Anreicherungstyp eine relativ geringe Sensorempfindlichkeit auf. Zusätzlich muss der Kanal 26 über seine gesamte Länge invertiert werden, um einen Stromfluss von Quelle 16 zu Senke 14 zu erreichen. Da das Auflösungsvermögen eines derartigen Sensors neben der Dicke der Oxidschicht 24 auch durch die Dimension des Kanals 26 bestimmt ist, ist das Auflösungsvermögen des in Fig. 1 gezeigten Sensors durch den Abstand zwischen Senke 14 und Quelle 16 begrenzt, d.h. es kann nicht besser als die Länge des Kanals 26 sein.

10

In Fig. 2 ist ein Sensor nach Art eines Sperrschicht-Feldeffekttransistors (junction field effect transistor JFET) vom Verarmungstyp mit planarer Sensoroberfläche 12 dargestellt. Im Gegensatz zum FET vom Anreicherungstyp weist der Kanal 26 eines FET vom Verarmungstyp eine Dotierung vom gleichen Typ wie Senke 14 und Quelle 16 auf – im gezeigten Beispiel eine n-Dotierung. Das System Kanal 26 / Substrat 10 bildet folglich einen pn-Übergang.

Der Kanal 26 ist bereits in einem Ausgangszustand leitend, so dass bei Anlegen einer Spannung zwischen Senke 14 und Quelle 16 auch ohne die Wechselwirkung des Sensors mit einem äußeren elektrischen Feld ein Strom fließt. Auf diese Weise werden schwächere elektrische Felder einer Messung zugänglich gemacht, so dass ein FET vom Verarmungstyp eine höhere Sensorempfindlichkeit aufweist als ein FET vom Anreicherungstyp. Gleichzeitig kann ein höheres Auflösungsvermögen des Sensors erreicht werden, da für einen Stromfluss zwischen Quelle 16 und Senke 14 nicht der gesamte Kanal 26 invertiert werden muss. Die Auflösung ist grundsätzlich also nicht durch die Länge des Kanals 26 begrenzt.

WO 03/042627

PCT/EP02/12513

12

Zusätzlich ist das Substrat 10 eines JFET mit einer Einstellelektrode 28 kontaktiert, die mit einer Spannungsquelle 30 verbunden ist, um zwischen Substrat 10 und Kanal 26 eine Einstellspannung anzulegen. Durch die Einstellspannung lässt sich die Ausdehnung des Kanals 26 in zur Sensoroberfläche 12 senkrechter Richtung, d.h. die Tiefe des Kanals 26, variieren. Durch Anlegen der Spannung in Sperrrichtung des pn-Übergangs kann der Querschnitt des Kanals 26 durch Verarmung an Ladungsträgern verkleinert werden.

10

Man gewinnt durch die Einstellspannung folglich eine zusätzliche Möglichkeit, die Leitfähigkeit des Kanals 26 voreinzustellen und somit die Empfindlichkeit des Sensors an die Stärke eines zu untersuchenden elektrischen Feldes anzupassen.

15

Fig. 3 zeigt einen erfindungsgemäßen Sensor nach Art eines Sperrschicht-Feldeffekttransistors (JFET) vom Verarmungstyp. Im Gegensatz zu bekannten, beispielsweise in Fig. 1 und Fig. 2 gezeigten, Sensoren ist die Sensoroberfläche 12 des erfindungsgemäßen Sensors zumindest bereichsweise dreidimensional und vorzugsweise als Spitze ausgebildet. Eine nicht abschließende Auswahl erfindungsgemäß in Betracht kommender Ausbildungen einer dreidimensionalen Sensoroberfläche 12 ist exemplarisch in Fig. 4 dargestellt: So kann die Sensoroberfläche 12 beispielsweise als (a) 3- oder 4-seitige Pyramidenspitze oder als (b) Kegelspitze ausgebildet sein. Denkbar ist aber auch eine (c) treppenartige oder (d) keilförmige Ausbildung der Spitze. Darüber hinaus umfasst die erfindungsgemäße dreidimensionale Ausbildung der Substratoberfläche 12 auch sphärische Formen.

25

WO 03/042627

PCT/EP02/12513

13

Die Sensoroberfläche 12 des Sensors in Fig. 3 ist zumindest bereichsweise als Pyramidenspitze ausgebildet. Eine derartige Struktur lässt sich durch bekannte Ätz- oder Sägeverfahren in Substraten, insbesondere aus kristallinem Silizium, leicht herstellen.

Das Substrat 10 des Sensors besteht aus p-dotiertem Silizium, während Senke 14 und Quelle 16 als n-dotierte Bereiche im Substrat 10 ausgebildet sind. Dabei sind Senke 14 und Quelle 16 an der Pyramidenbasis im planen Bereich 32 der Sensoroberfläche 12 angeordnet und erstrecken sich in einem oberflächennahen Bereich entlang eines größten Teils der Pyramidenflanken 34 in Richtung der Pyramidenspitze 36. Der oberflächennahe Bereich der Pyramidenspitze 36 selbst ist als Kanal 26 ausgebildet. Dabei kann es sich, wie bereits voranstehend erläutert, um einen invertierten oder dotierten Kanal handeln, so dass ein Sensor nach Art eines FET vom Anreicherungstyp oder – wie im dargestellten Beispiel – vom Verarmungstyp vorliegt.

Mittels einer an der Senke 14 angebrachten Senkenelektrode 18 sowie einer an der Quelle 16 angebrachten Quellenelektrode 22 lässt sich zwischen Senke 14 und Quelle 16 mittels einer Spannungsquelle 20 eine Spannung anlegen und mittels einer Strommesseinrichtung 38 ein durch den Kanal 26 zwischen Quelle 16 und Senke 14 fließender Strom messen. Dabei lässt sich durch eine mittels einer am Substrat 10 angebrachten Einstellelektrode 28 an das Substrat 10 anlegbare Spannung der elektrische Widerstand des Kanals 26 voreinstellen.

WO 03/042627

PCT/EP02/12513

14

Wird der Sensor, d.h. die Pyramidenspitze 36, nunmehr in die Nähe oder in Kontakt mit der Probenoberfläche 40 einer zu untersuchenden Probe 42 gebracht und zwischen Sensor und Probe 42 mittels einer Spannungsquelle 44 eine Spannung angelegt, so wird zwischen Probenoberfläche 40 und Pyramidenspitze 36 ein elektrisches Feld erzeugt, welches auf den Kanal 26 einwirkt und dessen Leitfähigkeit verändert. Anhand des in der Messeinrichtung 38 ermittelten Stromflusses zwischen Senke 14 und Quelle 16 lässt sich die Stärke des elektrischen Feldes zwischen Probenoberfläche und Pyramidenspitze 36 ermitteln und auf die Beschaffenheit der Probenoberfläche 40 zurückschließen.

Das laterale Auflösungsvermögen des Sensors ist zum einen vom Abstand der Pyramidenspitze 36 zur Probenoberfläche 40 abhängig. Dabei wird ein minimaler Abstand durch die Dicke der die Sensoroberfläche 12 überdeckenden Oxidschicht 24 vorgegeben.

Zum anderen hängt das Auflösungsvermögen von der lateralen Ausdehnung des Kanals 26 ab. Da der Kanal 26 erfindungsgemäß über den Scheitel der Pyramidenspitze 36 gelegt ist, ist die effektive Dimension des Kanals 26 wegen der quadratischen Abhängigkeit der elektrischen Feldstärke vom Abstand zur Probenoberfläche 40 kleiner als die tatsächliche Dimension des Kanals 26. Das Auflösungsvermögen des Sensors wird umso höher, je steiler die Pyramide ausgebildet ist, d.h. je kleiner der Winkel ist, den die Pyramidenflanken 34 miteinander bilden.

25

Ein erfindungsgemäßer Sensor lässt sich beispielsweise in der Spitze einer Rastersonde eines Rastersondenmikroskops integrieren und in einer Rasterbewegung relativ zu einer Probenoberfläche bewegen, wodurch eine

WO 03/042627

PCT/EP02/12513

15

hoch orts aufgelöste Untersuchung einer Probenoberfläche ermöglicht wird.

5 Dabei lässt sich der Sensor beispielsweise in einer konstanten Höhe Z bezüglich einer zumindest annähernd durch die Probenoberfläche 40 definierten XY-Ebene über die Probenoberfläche 40 hinweg bewegen, wobei in Abhängigkeit vom Ort des Sensors der Stromfluss durch den Transistor aufgezeichnet wird. Alternativ kann der Sensor der Kontur der Probenoberfläche 40 folgend derart über die Probenoberfläche 40 hinweg
10 bewegt werden, dass der Stromfluss durch den Transistor stets konstant bleibt, wobei die Auslenkung des Sensors in Z-Richtung in Abhängigkeit der XY-Position des Sensors aufgezeichnet wird. In beiden Fällen lässt sich ein orts aufgelöstes Abbild der Probenoberfläche 40 erstellen, welches Rückschlüsse auf die Beschaffenheit der Probe 42 oder Probenoberfläche
15 40 zulässt.

Da auch in der Rasterkraftmikroskopie Sonden mit Spitzengeometrie verwendet werden, kann ein erfindungsgemäßer Sensor zusätzlich oder gleichzeitig auch für eine Sonde eines konventionellen Rasterkraftmikro-
20 skops verwendet werden.

In Sensoren, die auf dem Prinzip des Feldeffekttransistors vom Verarmungstyp basieren, kann durch Anlegen einer Sperrspannung an das Halbleitersubstrat 10 die effektive Breite und Tiefe des Kanals 26 verrin-
25 gert werden und damit sowohl die Sensitivität als auch die laterale Auflösung des Sensors über das durch die lithographische Strukturierung vorgegebene Maß hinaus erhöht werden. Durch die Kombination des JFET-Prinzips mit einem Verarmungstyp FET lassen sich somit eine Viel-

- 5 1. Detektoren für elektrische Felder, die zwischen einer zu unter-
suchenden Festkörperoberfläche und dem Sensor bestehen, wo-
bei sich die Feldstärke aus dem an der zu untersuchenden Probe
anliegenden elektrischen Potential, der Dielektrizitätskonstanten
eines auf der Probenoberfläche vorhandenen Isolatormaterials
10 und dem Probenabstand zum Sensor ergibt.
2. Detektoren für elektrische Ladungen, insbesondere elektrisch
geladene Moleküle oder Atome (Ionen), welche sich in der Nähe
des Sensors in der Gasphase, in Lösung oder absorbiert an einer
15 Festkörperoberfläche befinden.
3. Chemische Sensoren, durch die eine selektive Anlagerung von
chemischen Spezies (z.B. Ionen oder Molekülen) an eine entspre-
chend präparierte Kanalelektrode detektierbar ist. Durch die An-
20 lagerung wird das Potential der Kanalelektrode (z.B. durch eine
Änderung der Austrittsarbeit des Elektrodenmaterials) verscho-
ben, was eine messbare Änderung des Kanalwiderstands zur
Folge hat. Als chemisch selektive Materialien dienen dabei ent-
weder die Kanalelektrode selbst (z.B. Palladium für Wasserstoff)
25 oder andere, meist organische Materialien, welche die zu detek-
tierende Spezies selektiv binden. Das selektive Material befindet
sich dabei entweder zwischen der Kanalelektrode und der den
Kanal überdeckenden Oxidschicht (vgl. z.B. US 4,698,657) oder

WO 03/042627

PCT/EP02/12513

17

wird, beispielsweise als selbstorganisierender Dünnschicht (self assembled monolayer), direkt auf die Kanalelektrode aufgebracht (vgl. z.B. US 4,881,109).

5 Bei einem chemischen Sensor ohne Kanalelektrode kann das elektrische Feld über den FET-Kanal auch durch eine Elektrolytlösung erzeugt werden, welche mittels einer ionenselektiven Membran in direktem Kontakt mit der den Kanal überdeckenden Oxidschicht steht (vgl. P. Bergveld, IEEE Transactions of Biomedical Engineering; Vol. 19; 342ff (1972), und K.D. Wise et al.,
10 IEEE Transactions of Biomedical Engineering; Vol. 21; 485ff (1974)).

15 Im Gegensatz zu den zitierten verschiedenen Ausführungsarten chemischer FET-Sensoren ist erfindungsgemäß die chemische Detektion mittels FET-Sensoren im Verarmungsbetrieb und insbesondere in Kombination mit dem Sperrschichtbetrieb (JFET-Effekt) vorgesehen.

20 4. Hochauflösende Temperatursensoren für die Rastersondenmikroskopie, bei denen der Effekt ausgenutzt wird, dass sich der Widerstand des Kanals mit der Temperatur ändert.

Grundsätzlich ist der Einsatz erfindungsgemäßer Sensoren nicht auf
25 Sondenspitzen begrenzt, sondern überall dort vorgesehen, wo bereits die Erhöhung der Auflösung in einer Dimension eine Verbesserung darstellt und/oder die zweite Dimension durch andere lithographische Verfahren bestimmt wird. Als Beispiel sei die Anwendung als chemischer Detektor in

WO 03/042627

PCT/EP02/12513

18

5 einem mikrostrukturierten Transportkanal (microfluidic channel) zur spezifischen oder unspezifischen Detektion vorbeiströmender chemischer Spezies gemäß der voranstehend aufgeführten Punkte 2 und 3 genannt. Ein weiteres Beispiel stellt die Verwendung als elektrostatischer Abtast-

5 sensor („Lesekopf“) für auf Massenspeichern gespeicherte elektrische Ladungen dar, in Analogie zu einem magnetischen Lesekopf herkömmlicher Festplattenlaufwerke.

10 Einen weiteren Gegenstand der Erfindung stellt der in Fig. 5 gezeigte Hallsensor zur Detektion magnetischer Felder nach dem Halleffekt-Prinzip dar. Der erfindungsgemäße Hallsensor weist ein p-leitendes Siliziumsubstrat auf, in dessen oberflächennahem Bereich zwei n-leitende Kanäle 112, 114 vorgesehen sind, die senkrecht zueinander verlaufen und sich in einem Kreuzungsbereich 116 kreuzen. Durch Anlegen einer Spannung

15 kann durch einen Kanal 112 ein konstanter Steuerstrom I_{Steuer} fließen, wobei die durch ein äußeres magnetisches Feld erzeugte Hallspannung V_{Hall} am anderen Kanal 114 gemessen werden kann.

20 Die Kanäle 112, 114 bilden mit dem Substrat 110 jeweils einen pn-Übergang, wobei die Bereiche 122 die jeweiligen Raumladungs- oder Verarmungszonen kennzeichnen.

Wie in Fig. 6 gezeigt ist, ist am Substrat 110 eine mit einer Spannungsquelle 118 verbundene Elektrode 120 angebracht. Durch Anlegen einer

25 Spannung zwischen den Kanälen 112, 114 und dem Substrat 110 lässt sich die Ausdehnung der Kanäle 112, 114 verändern, beispielsweise durch Verarmung an Ladungsträgern verringern, wenn die Spannung in Sperrrichtung der pn-Übergänge angelegt wird. Auf diese Weise wird lässt sich

WO 03/042627

PCT/EP02/12513

19

insbesondere auch der Kreuzungsbereich 116 verkleinern. Dies wiederum resultiert in einer Verbesserung des Auflösungsvermögens des Hallsensors.

- 5 Ein weiterer Gegenstand der Erfindung ist die in Fig. 7 gezeigte Halbleiterelektrode, deren Elektrodenfläche erfindungsgemäß nach dem JFET-Prinzip einstellbar ist. Die Halbleiterelektrode weist ein p-leitendes Siliziumsubstrat 210 auf, in dem ein unterhalb einer Substratoberfläche 212 und im wesentlichen parallel zu dieser Oberfläche 212 verlaufender n-
- 10 leitender Kanalabschnitt 214 ausgebildet ist. An seinem einen Ende ist dieser Kanalabschnitt 214 mittels einer Elektrode 216 mit einer Strom- oder Spannungsquelle 218 verbunden. Am anderen Ende des parallel verlaufenden Kanalabschnitts 214 schließt sich ein senkrecht zur Oberfläche 212 verlaufender und bis an die Oberfläche 12 heranreichender Kanalabschnitt 220 an, dessen Ausdehnung an der Oberfläche 212 die
- 15 Elektrodenfläche definiert.

- Am Substrat 210 ist außerdem eine mit einer Spannungsquelle 222 verbundene Elektrode 224 zum Anlegen einer Sperrspannung angebracht.
- 20 Durch Anlegen einer Sperrspannung zwischen dem Substrat 210 und dem n-dotierten Bereich 214, 220 kann die Ausdehnung des senkrechten Kanalabschnitts 220 an der Substratoberfläche 212 kontrolliert werden. Auf diese Weise lässt sich bei einer erfindungsgemäßen Halbleiterelektrode eine elektrisch einstellbare Elektrodenfläche erreichen, deren Größe die
- 25 der lithographisch vorgegebenen Elektrodenfläche unterschreitet.

Die erfindungsgemäße Halbleiterelektrode lässt sich folglich als Detektionsmittel mit einer elektrisch einstellbaren lateralen Auflösung verwenden.

WO 03/042627

PCT/EP02/12513

20

den, wobei die elektrisch eingestellte Auflösung die lithographisch vorgegebene Auflösung übertreffen kann. Darüber hinaus kann sich dadurch, dass der senkrecht verlaufende Kanalabschnitt 220 von dem entgegengesetzten elektrischen Potential des Substrats umgeben ist, eine Konzentration der Feldstärke in zur Substratoberfläche 212 senkrechter Richtung
5 ergeben und zu einem Fokussierungseffekt führen, der zu einer weiteren Steigerung der Auflösung beiträgt.

Eine erfindungsgemäße Halbleiterelektrode kann beispielsweise als hoch
10 ortsauflösende Sonde für Kapazitätsmessungen oder als elektrochemische Sonde zur Bestimmung des elektrochemischen Potentials einer Elektrolytlösung eingesetzt werden. Dabei kann die Halbleiterelektrode erfindungsgemäß in die Spitze einer Sonde eines Rastersondenmikroskops integriert sein und zur Kapazitätsmessung bzw. elektrochemischen Potentialbe-
15 stimmung benutzt werden. In Verbindung mit Metallelektroden werden beide Mikroskopiearten angewendet und als „Scanning Capacitance Microscopy“ (SCN) bzw. „Scanning Electrochemical Microscopy“ (SECM) bezeichnet.

WO 03/042627

PCT/EP02/12513

21

Bezugszeichenliste

	10	Substrat
	12	Sensoroberfläche
5	14	Senke
	16	Quelle
	18	Senkenelektrode
	20	Spannungsquelle
	22	Quellenelektrode
10	24	Oxidschicht
	26	Kanal
	28	Einstellelektrode
	30	Spannungsquelle
	32	planarer Bereich
15	34	Pyramidenflanke
	36	Pyramidenspitze
	38	Strommesseinrichtung
	40	Probenoberfläche
	42	Probe
20	44	Spannungsquelle
	110	Substrat
	112	Kanal
	114	Kanal
	116	Kreuzungsbereich
25	118	Spannungsquelle
	120	Elektrode
	122	Verarmungszone
	210	Substrat
	212	Oberfläche
30	214	paralleler Kanalabschnitt
	216	Elektrode
	218	Stromquelle
	220	senkrechter Kanalabschnitt
	222	Spannungsquelle
35	224	Elektrode

WO 03/042627

PCT/EP02/12513

22

Ansprüche

1. Sensor, insbesondere für eine Sonde eines Rastersondenmikros-
5 kops, zum Untersuchen sich benachbart zum Sensor befindlicher
Probenoberflächen (40) oder Felder, mit zumindest einem, wenigstens ein Halbleitermaterial aufweisenden Feldeffekttransistor (FET) ohne Kanalelektrode, dessen Oberfläche (12) zumindest im Bereich des Kanals (gate 26) dreidimensional ausgebildet ist.
- 10 2. Sensor nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Oberfläche (12) im Bereich des Kanals (gate 26) pyramidenartig ausgebildet ist.
- 15 3. Sensor nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Oberfläche (12) im Bereich des Kanals (gate 26) kegelförmig ausgebildet ist.
- 20 4. Sensor nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Oberfläche (12) im Bereich des Kanals (gate 26) treppenartig ausgebildet ist.
- 25 5. Sensor nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet,

WO 03/042627

PCT/EP02/12513

23

dass die Oberfläche (12) im Bereich des Kanals (gate 26) keilförmig ausgebildet ist.

5 6. Sensor nach einem der vorherigen Ansprüche,
 dadurch gekennzeichnet,
 dass der Transistor als Feldeffekttransistor vom Anreicherungstyp
 (enhancement mode FET) ausgebildet ist.

10 7. Sensor nach einem der Ansprüche 1 bis 5,
 dadurch gekennzeichnet,
 dass der Transistor als Feldeffekttransistor vom Verarmungstyp
 (depletion mode FET) ausgebildet ist.

15 8. Sensor nach Anspruch 7,
 gekennzeichnet durch
 eine Elektrode (28) zum Anlegen einer Einstellspannung, um den
 elektrischen Widerstand des Kanals (gate 26) elektrisch voreinzu-
 stellen.

20 9. Sensor nach einem der vorherigen Ansprüche,
 dadurch gekennzeichnet,
 dass der Transistor als Sperrschicht-Feldeffekttransistor (junction
 field effect transistor JFET) ausgebildet ist.

25 10. Verfahren zum orts aufgelösten Untersuchen einer sich im Wesentli-
 chen in XY-Richtung erstreckenden Probenoberfläche (40), bei dem

WO 03/042627

PCT/EP02/12513

24

ein Sensor nach einem der vorherigen Ansprüche an einem zur Probenoberfläche (40) weisenden Ende einer Sonde eines Rastersondenmikroskops angebracht wird,

der Sensor in die Nähe der Probenoberfläche (40) gebracht wird,

zwischen Quelle (source 16) und Senke (drain 14) des Transistors eine Spannung angelegt wird,

zwischen Probe (42) und Sensor gegebenenfalls eine Spannung angelegt wird,

der Sensor, insbesondere in einer Rasterbewegung, in XY-Richtung relativ zur Probenoberfläche (40) bewegt wird, wobei

entweder der Sensor in einer konstanten Höhe Z bezüglich der XY-Ebene über der Probenoberfläche (40) gehalten wird und der Stromfluss von der Quelle (source 16) durch den Kanal (gate 26) zur Senke (drain 14) gemessen und in Abhängigkeit der XY-Position des Sensors aufgezeichnet wird,

oder der Sensor derart in konstantem Abstand zur Probenoberfläche (40) bewegt wird, dass der Stromfluss von der Quelle (source 16) durch den Kanal (gate 26) zur Senke (drain 14) konstant bleibt, und das Ausmaß einer Bewegung des Sensors in Z-Richtung in Abhängigkeit der XY-Position des Sensors aufgezeichnet wird, und

aus den aufgezeichneten Strom- oder Auslenkungswerten ein Abbild der Probenoberfläche (40) erstellt wird.

11. Verfahren nach Anspruch 10,
dadurch gekennzeichnet,

WO 03/042627

PCT/EP02/12513

25

dass ein Sensor nach einem der Ansprüche 7 bis 9 verwendet wird und eine Einstellspannung an den Sensor angelegt wird, um den Widerstand des Kanals (gate 26) auf einen vorbestimmten Wert vor-einzustellen.

5

12. Hallsensor aus zumindest einem Halbleitermaterial zum Detektieren von magnetischen Feldern, dessen laterales Auflösungsvermögen elektrisch einstellbar ist.

10

13. Hallsensor nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass in einem Substrat (110) zumindest zwei quer zueinander, insbesondere senkrecht aufeinander stehende, sich in einem Kreuzungsbereich (116) kreuzende Kanäle (112, 114) vorgesehen sind, die eine gegenüber dem Substrat (110) umgekehrte Polarität der Mehrheitsladungsträger aufweisen, wobei an einem Kanal (112) zur Erzeugung eines Stromflusses durch den Kanal (112) eine Steuerungspannung anlegbar und an dem anderen Kanal (114) eine durch ein magnetisches Feld erzeugte Hallspannung messbar ist.

20

14. Hallsensor nach Anspruch 13, gekennzeichnet durch eine Elektrode (120) zum Anlegen einer Einstellspannung, um die Ausdehnung des Kreuzungsbereiches (116) in der durch die Kanäle (112, 114) aufgespannten Ebene einzustellen.

25

15. Halbleiterelektrode, deren Elektrodenfläche elektrisch einstellbar ist.

WO 03/042627

PCT/EP02/12513

26

16. Halbleiterelektrode nach Anspruch 15,
dadurch gekennzeichnet,
dass in einem Halbleitersubstrat (210) ein von außerhalb des Sub-
strats (210) kontaktierbarer, im wesentlichen parallel zur Substrat-
oberfläche (212) verlaufender erster Kanalabschnitt (214) vorgese-
hen ist, der in einen senkrecht zur Substratoberfläche (212) verlau-
fenden zweiten Kanalabschnitt (220) übergeht, welcher an die Sub-
stratoberfläche (212) grenzt, wobei die Elektrodenfläche durch die
laterale Ausdehnung des zweiten Kanalabschnitts (220) an der Sub-
stratoberfläche (212) bestimmt ist.
17. Halbleiterelektrode nach Anspruch 16,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Kanalabschnitte (214, 220) eine gegenüber dem Substrat
(210) umgekehrte Polarität der Mehrheitsladungsträger aufweisen.
18. Halbleiterelektrode nach Anspruch 17,
gekennzeichnet durch
eine Elektrode zum Anlegen einer Einstellspannung, um die Aus-
dehnung der Kanalabschnitte (214, 220) und insbesondere die Aus-
dehnung des zweiten Kanalabschnitts (220) an der Substratoberflä-
che (212) einzustellen.
19. Verfahren zur orts aufgelösten Kapazitätsmessung oder elektroche-
mischen Potentialbestimmung einer sich in XY-Richtung erstre-
ckenden Probe, bei dem

WO 03/042627

PCT/EP02/12513

27

eine Halbleiterelektrode nach einem der Ansprüche 15 bis 18
 an einem zur Probenoberfläche weisenden Ende einer Sonde eines
 Rastersondenmikroskops angebracht wird,
 an dem Halbleitersubstrat eine Einstellspannung angelegt
 5 wird, um die Ausdehnung der Elektrodenfläche auf einen vorbe-
 stimmten Wert einzustellen,
 die Elektrode, insbesondere in einer Rasterbewegung, in XY-
 Richtung relativ zur Probe bewegt wird,
 die Elektrode in vorbestimmten Abständen mit der Probe in
 10 Kontakt gebracht wird, wobei
 zwischen Probe und Sensor gegebenenfalls eine Spannung
 angelegt wird, die Kapazität oder das elektrochemische Potential der
 Probe bestimmt und in Abhängigkeit der XY-Position der Elektrode
 aufgezeichnet wird, und
 15 aus den aufgezeichneten Kapazitäts- oder Potentialwerten ein
 Abbild der Probe erstellt wird.

WO 03/042627

PCT/EP02/12513

1 / 5

FIG. 1

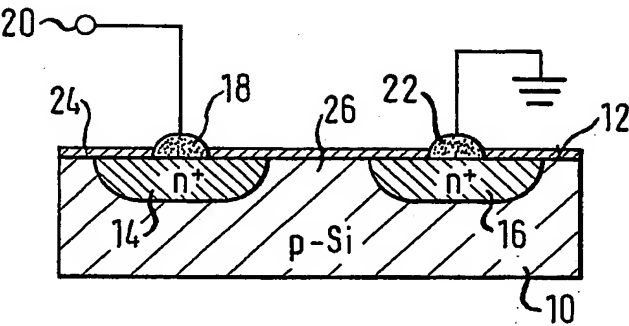
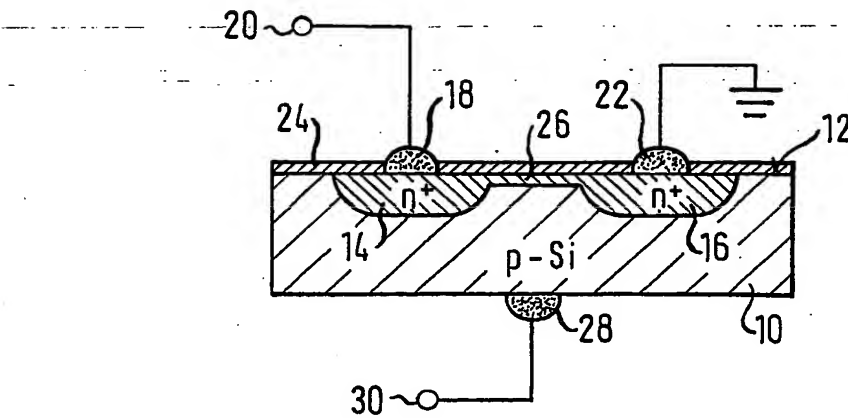
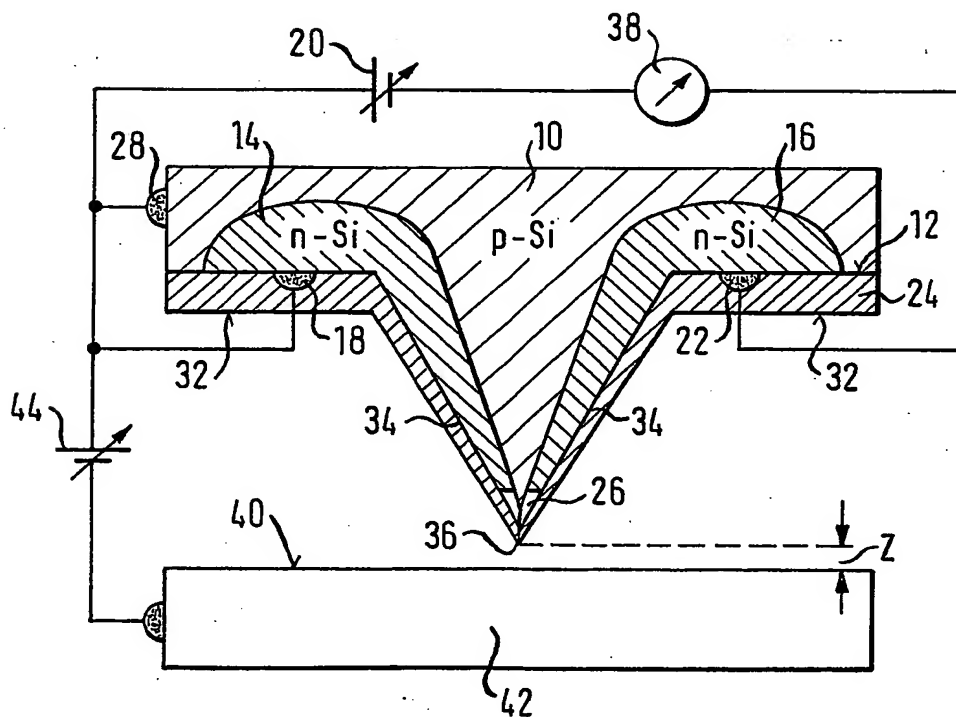


FIG. 2



215

FIG. 3



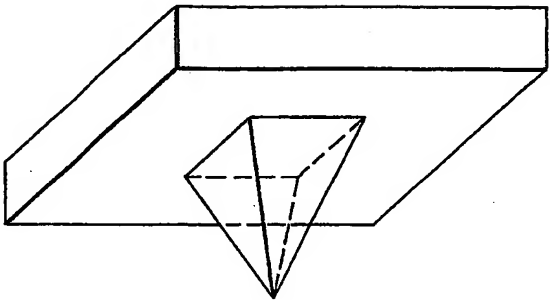
WO 03/042627

PCT/EP02/12513

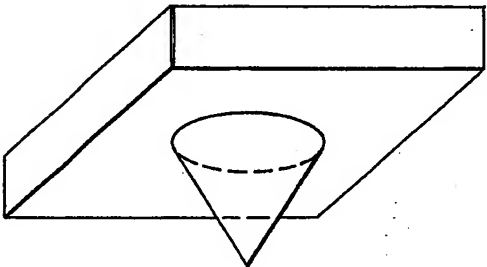
3 / 5

FIG. 4

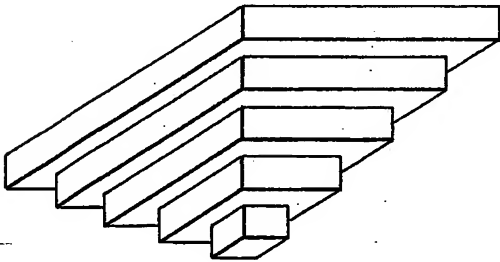
(a)



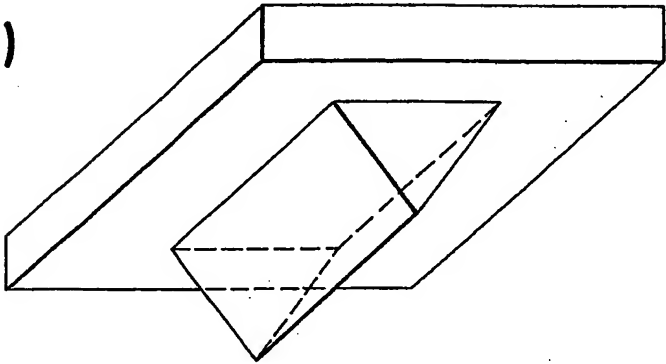
(b)



(c)



(d)



4 / 5

FIG. 5

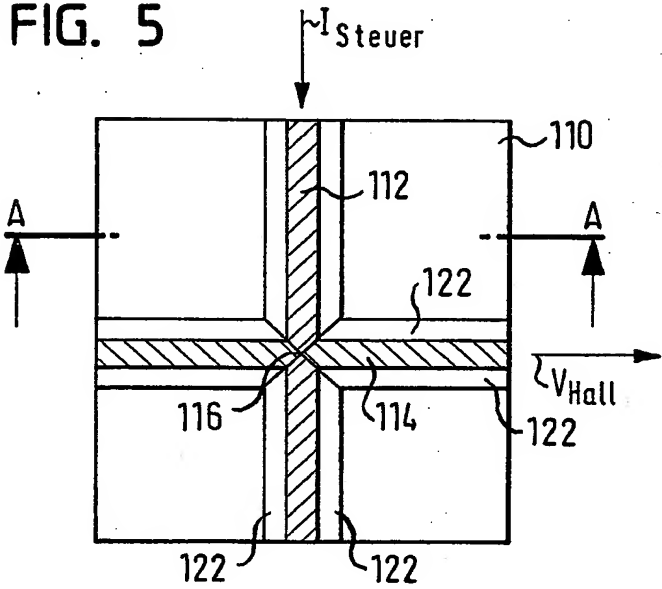
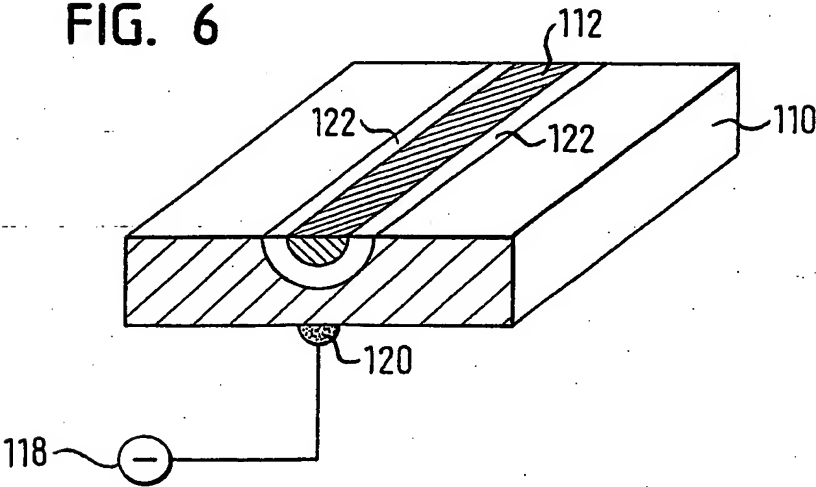


FIG. 6



WO 03/042627

PCT/EP02/12513

5 / 5

FIG. 7

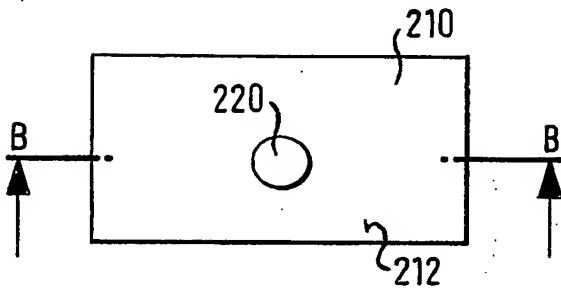
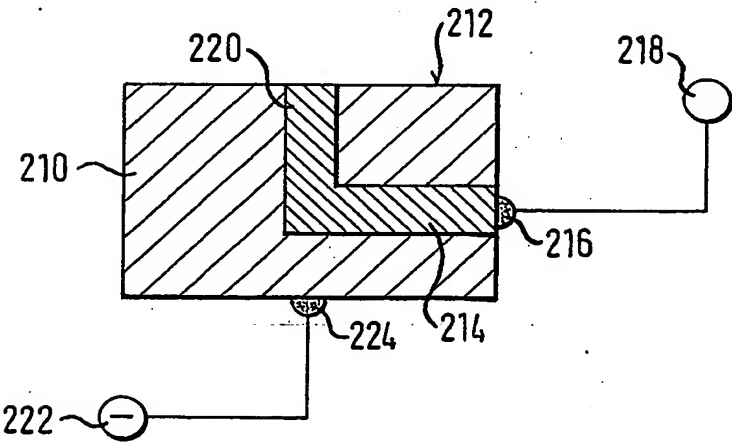


FIG. 8



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☒ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.